

# Рентгенофлуоресцентный анализ стекол $\text{Ge}_{1-x}\text{Se}_x$ , $\text{As}_{1-x}\text{Se}_x$ и $\text{Ge}_{1-x-y}\text{As}_y\text{Se}_x$ с использованием электронного возбуждения

© Е.И. Теруков<sup>+</sup>, П.П. Серегин<sup>\*†</sup>, А.В. Марченко<sup>\*</sup>, Д.В. Жилина<sup>+</sup>, К.У. Бобохужаев<sup>\*</sup>

<sup>+</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*</sup> Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, 191186 Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*</sup> Национальный университет Узбекистана, 100174 Ташкент, Узбекистан

(Получена 19 февраля 2015 г. Принята к печати 25 февраля 2015 г.)

Метод рентгенофлуоресцентного анализа с возбуждением флуоресценции пучком электронов с энергией 30 кВ применен для определения содержания германия, мышьяка и селена в стеклообразных сплавах  $\text{Ge}_{1-x}\text{Se}_x$ ,  $\text{As}_{1-x}\text{Se}_x$  и  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{As}_y\text{Se}_x$ . С использованием калибровочных зависимостей количественный состав стекол определен с точностью  $\pm 0.0002$  по параметрам  $x$  и  $y$  в поверхностном слое глубиной  $\sim 0.1$  мкм.

## 1. Введение

Отсутствие дальнего порядка в структуре халькогенидных стеклообразных полупроводников не позволяет для определения состава стекол использовать рентгенофазовый анализ, тогда как наличие в большинстве стекол мышьяка создает проблемы применения для этих целей методов аналитической химии. Как было показано [1–4], перспективным в этом отношении является метод рентгенофлуоресцентной спектроскопии — анализ характеристического рентгеновского излучения мишени, возбуждаемого тормозным излучением рентгеновской трубки, позволяет с высокой точностью определять количественный состав мишени, причем, учитывая большую глубину проникновения рентгеновского излучения ( $\sim 1$  мм), получаемые данные относятся к объемной части материала. Однако число работ, относящихся к применению рентгенофлуоресцентной спектроскопии для определения количественного состава халькогенидных стекол, невелико, причем во всех работах характеристическое рентгеновское излучение мишени возбуждалось только тормозным рентгеновским излучением [1–4].

В настоящей работе приведены экспериментальные результаты по определению количественного состава стеклообразных сплавов  $\text{Ge}_{1-x}\text{Se}_x$ ,  $\text{As}_{1-x}\text{Se}_x$  и  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{As}_y\text{Se}_x$  методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии, причем сравниваются возможности методик с использованием возбуждения как тормозным рентгеновским излучением (с максимальной энергией 30 кэВ), так и пучком моноэнергетических (30 кэВ) электронов.

## 2. Методика эксперимента

Стеклообразные сплавы  $\text{Ge}_{1-x}\text{Se}_x$  ( $\text{Ge}_{0.1}\text{Se}_{0.9}$ ,  $\text{Ge}_{0.2}\text{Se}_{0.8}$ ,  $\text{Ge}_{0.333}\text{Se}_{0.667}$ ,  $\text{Ge}_{0.4}\text{Se}_{0.6}$ ),  $\text{As}_{1-x}\text{Se}_x$  ( $\text{As}_{0.02}\text{Se}_{0.98}$ ,  $\text{As}_{0.1}\text{Se}_{0.9}$ ,  $\text{As}_{0.4}\text{Se}_{0.6}$ ,  $\text{As}_{0.417}\text{Se}_{0.583}$ ,

$\text{As}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$ ,  $\text{As}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ ), и  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{As}_y\text{Se}_x$  ( $\text{Ge}_{0.048}\text{As}_{0.476}\text{Se}_{0.476}$ ,  $\text{Ge}_{0.1}\text{As}_{0.4}\text{Se}_{0.5}$ ,  $\text{Ge}_{0.138}\text{As}_{0.345}\text{Se}_{0.517}$ ,  $\text{Ge}_{0.167}\text{As}_{0.2}\text{Se}_{0.633}$ ,  $\text{Ge}_{0.167}\text{As}_{0.333}\text{Se}_{0.5}$ ,  $\text{Ge}_{0.2}\text{As}_{0.4}\text{Se}_{0.4}$ ,  $\text{Ge}_{0.25}\text{As}_{0.111}\text{Se}_{0.639}$ ,  $\text{Ge}_{0.3}\text{As}_{0.25}\text{Se}_{0.45}$ ) синтезировались из элементарных веществ в тонкостенных кварцевых ампулах при температуре 950°C с последующей закалкой расплава ( $\sim 1$  г) в воду. Стеклообразные „корольки“ массой  $\sim 1$  г представляли собой монолитные слитки, верх ампул не содержал следов возгонки. Критериями стеклообразного состояния служили раковистый излом, отсутствие линий на дебаграммах, отсутствие включений и неоднородностей при просмотре полированных поверхностей в металломикроскопе МИМ-7 и инфракрасном микроскопе МИК-1. Образцы для рентгенофлуоресцентного анализа не подвергались специальной механической обработке (шлифованию, полированию и др.). Составы сплавов приведены по составу исходной шихты, определенной с погрешностью  $\pm 0.001$ , за исключением сплавов  $\text{As}_{0.4}\text{Se}_{0.6}$ ,  $\text{Ge}_{0.333}\text{S}_{0.667}$  и  $\text{Ge}_{0.333}\text{As}_{0.333}\text{Se}_{0.333}$ , состав которых был определен с погрешностью  $\pm 0.0002$ .

Спектры рентгеновской флуоресценции при их возбуждении моноэнергетическими электронами измерялись на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO 40 с датчиком рентгеновского микроанализа INCA X-act. Энергия первичного пучка электронов составляла 30 кэВ, ток не превышал 300 пА, диаметр анализируемой площади составлял  $\sim 30$  нм. Для исключения зарядки поверхности образцы предварительно покрывались пленкой углерода толщиной  $\sim 20$  нм. Спектры рентгеновской флуоресценции при их возбуждении тормозным рентгеновским излучением измерялись на спектрометре X-Art M с Si(Li)-блоком детектирования при значении анодного напряжения 30 кВ, размер анализируемой площади составлял  $\sim 1$  мм<sup>2</sup>.

Спектры характеристического рентгеновского излучения стеклообразных сплавов содержали все линии K-серий германия, мышьяка и селена. Поскольку наи-

<sup>†</sup> E-mail: ppseregin@mail.ru

более интенсивные и хорошо разрешенные линии представляли собой суперпозицию компонент  $K_{\alpha 1}$  и  $K_{\alpha 2}$ , далее мы ограничимся рассмотрением только этих  $K_{\alpha 1,2}$ -линий.

Для каждого образца спектр измерялся 5 раз в фиксированной точке его поверхности. При этом режим спектрометра поддерживался постоянным. Определялись площади под  $K_{\alpha 1,2}$ -линиями германия,  $S_{Ge}$ , мышьяка,  $S_{As}$ , и селена,  $S_{Se}$ , а далее с помощью соотношений  $x_{RFA} = S_{Se}/(S_{As} + S_{Se})$  (для сплавов  $As_{1-x}Se_x$ ),  $x_{RFA} = S_{Se}/(S_{Ge} + S_{Se})$  (для сплавов  $Ge_{1-x}Se_x$ ),  $x_{RFA} = S_{Se}/(S_{Ge} + S_{As} + S_{Se})$ ,  $y_{RFA} = S_{As}/(S_{Ge} + S_{As} + S_{Se})$  и  $z_{RFA} = S_{Se}/(S_{Ge} + S_{Se})$  (для сплавов  $Ge_{1-x-y}As_ySe_x$ , или, в другом варианте записи,  $As_y(Ge_{1-z}Se_z)_{1-y}$ ) вычислялись относительные площади спектральных линий германия, мышьяка и селена. Индекс „RFA“ означает, что значения  $x$ ,  $y$  и  $z$  определены из данных рентгенофлуоресцентного анализа. Значения среднеквадратичных отклонений величин  $x_{RFA}$ ,  $y_{RFA}$  и  $z_{RFA}$  в таких сериях измерений не превышали 0.0002.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждения

Если мишень  $A_{1-x}B_x$  облучается первичным монохроматическим рентгеновским или электронным излучением, то для случая „толстого“ анализируемого образца, т.е.

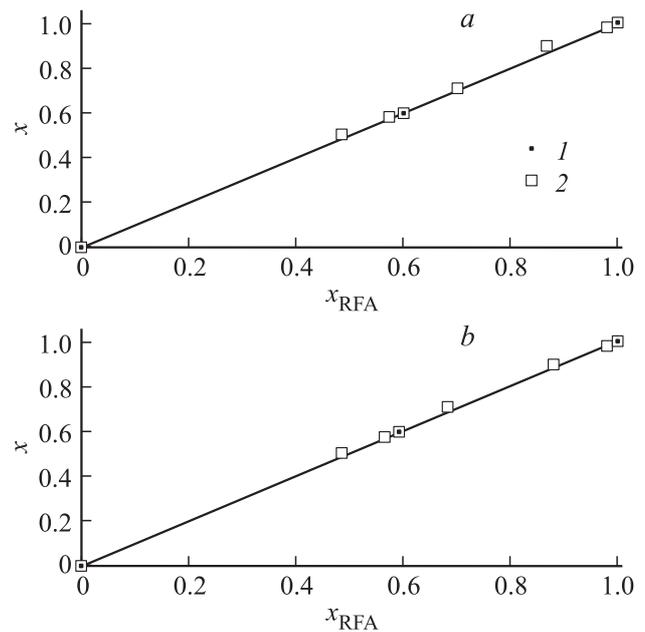
$$\left( \frac{\alpha_0}{\cos \theta} + \frac{\alpha_A}{\cos \varphi} \right) d < 1, \quad \left( \frac{\alpha_0}{\cos \theta} + \frac{\alpha_B}{\cos \varphi} \right) d < 1,$$

(где  $d$  — толщина анализируемого поверхностного слоя мишени,  $\theta$  — угол падения первичного рентгеновского или электронного пучка на мишень,  $\varphi$  — угол выхода характеристического рентгеновского излучения из мишени,  $\alpha_A$  — линейный коэффициент поглощения  $K_{\alpha 1,2}$ -линии веществом А мишени,  $\alpha_B$  — линейный коэффициент поглощения  $K_{\alpha 1,2}$ -линии веществом В мишени), отношения интенсивностей  $K_{\alpha 1,2}$ -линий атомов А и В определяются как

$$r = \frac{\omega_A \gamma_A \sigma_A}{\omega_B \gamma_B \sigma_B} \frac{1-x}{x} \left( \frac{\alpha_0 / \cos \theta + \alpha_B / \cos \varphi}{\alpha_0 / \cos \theta + \alpha_A / \cos \varphi} \right), \quad (1)$$

где  $\gamma_A$  и  $\gamma_B$  — эффективности регистрации детектором  $K_{\alpha 1,2}$ -излучения атомов А и В соответственно,  $\omega_A$  и  $\omega_B$  — выходы флуоресценции в линию возбужденных атомов А и В соответственно,  $\sigma_{0A}$  и  $\sigma_{0B}$  — сечения поглощения первичного излучения атомами А и В соответственно,  $\alpha_0$  — линейный коэффициент поглощения первичного излучения веществом мишени.

Используя табличные данные по величинам выхода флуоресценции, сечений ионизации атомов мышьяка, германия и селена [5,6] и рассчитанные для них линейные коэффициенты поглощения первичного излучения и  $K_{\alpha 1,2}$ -линий этих атомов веществом мишени,



**Рис. 1.** Калибровочные зависимости  $x = f(x_{RFA})$ , полученные при облучении мишеней электронами (а) и тормозным рентгеновским излучением (б) для стекол  $As_{1-x}Se_x$  (сплошные линии), построенные по трем точкам (1) и аппроксимированные полиномами:  $x = -0.0029x_{RFA}^2 + 1.0029x_{RFA}$  (а) и  $x = -0.0431x_{RFA}^2 + 1.0431x_{RFA}$  (б). 2 — значения  $x_{RFA}$  и  $x$  для стекол  $As_{1-x}Se_x$ .

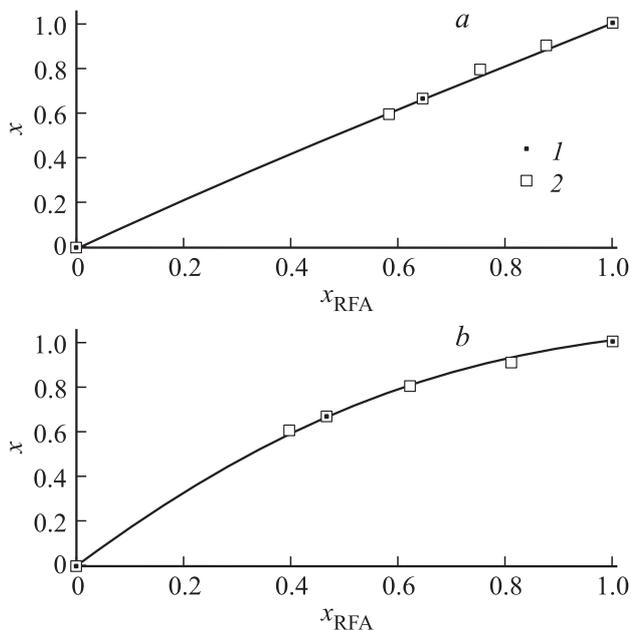
мы оценили, что для всех исследованных сплавов при облучении их тормозным рентгеновским излучением с максимальной энергией  $\sim 30$  кэВ глубина анализируемого слоя составляет  $d \sim 0.1$  мм, тогда как при облучении этих сплавов электронным пучком с энергией 30 кэВ  $d \sim 0.1$  мкм.

Поскольку отношение интенсивностей  $K_{\alpha 1,2}$ -линий для исследованных образцов зависит от многих факторов, практически невозможно непосредственное использование соотношения (1), и поэтому для определения концентраций германия, мышьяка и селена в бинарных сплавах мы использовали метод стандарта. С этой целью строились калибровочные зависимости  $x = f(x_{RFA})$  по трем точкам — для селена ( $x_{RFA} = 0$ ,  $x = 0$ ), для стандарта  $Ge_{0.3333}Se_{0.6667}$  ( $x_{RFA} = 0.3542$ ,  $x = 0.3333$ ) или  $As_{0.4}Se_{0.6}$  ( $x_{RFA} = 0.4007$ ,  $x = 0.4$ ) и для германия или мышьяка  $x_{RFA} = 1$ ,  $x = 1$ ). На рис. 1 представлены указанные зависимости для сплавов  $As_{1-x}Se_x$ , а на рис. 2 — для сплавов  $Ge_{1-x}Se_x$ . Все зависимости на рис. 1 и 2 аппроксимированы полиномами второй степени вида  $x = x_{RFA} + ax_{RFA}(1 - x_{RFA})$ . Выбор соединений  $GeSe_2$  и  $As_2Se_3$  в качестве стандартов объясняется тем, что они являются надежно установленными соединениями в системах  $Ge_{1-x}Se_x$ ,  $As_{1-x}Se_x$  и могут быть получены в стеклообразном состоянии с высокой точностью определения количественного состава по составу шихты методом сплавления исходных компонент. Коэффициент  $a$

определялся путем подстановки значений  $x_{RFA}$  и  $x$  для стандарта в уравнение интерполяционного полинома. Эти полиномы служат градуировочными соотношениями для определения состава мишеней (параметра  $x$ ) по полученному из рентгенофлуоресцентных спектров значению  $x_{RFA}$ .

Для демонстрации такой возможности на рисунках приведены экспериментальные значения  $x_{RFA}$  и  $x$  для стеклообразных сплавов  $As_{1-x}Se_x$  ( $x = 0.02, 0.1, 0.286, 0.4, 0.417, 0.5, 0.6$ ) (рис. 1) и  $Ge_{1-x}Se_x$  ( $x = 0.1, 0.2, 0.3333, 0.4$ ) (рис. 2). Видно, что для всех образцов экспериментальные данные хорошо укладываются на градуировочные соотношения между величинами  $x$  и  $x_{RFA}$ . Отклонение экспериментальных точек от градуировочных кривых вызваны отличием состава образцов от состава шихты.

Значения  $x_{RFA}$  в серии последовательных измерений рентгенофлуоресцентного спектра при фиксированных условиях воспроизводились с точностью  $2 \cdot 10^{-4}$ . Эта величина служит оценкой для погрешности определения  $x$  из рентгенофлуоресцентных спектров. Величины погрешности существенно ниже, чем при определении состава стеклообразных сплавов методами химического анализа, и рентгенофлуоресцентный анализ, по видимому, по точности не имеет конкурентов среди других неразрушающих методов определения состава аморфных материалов. Максимальное отклонение  $x$  от градуировочной кривой, вызванное отличием состава образцов от состава шихты, составляет  $\pm 0.02$ , и эта



**Рис. 2.** Калибровочные зависимости  $x = f(x_{RFA})$ , полученные при облучении мишеней электронами (а) и тормозным рентгеновским излучением (б) для стекол  $Ge_{1-x}Se_x$  (сплошные линии), построенные по трем точкам (1) и аппроксимированные полиномами:  $x = -0.0908x_{RFA}^2 + 1.0908x_{RFA}$  (а),  $x = -0.7915x_{RFA}^2 + 1.7915x_{RFA}$  (б). 2 — значения  $x_{RFA}$  и  $x$  для стекол  $Ge_{1-x}Se_x$ .

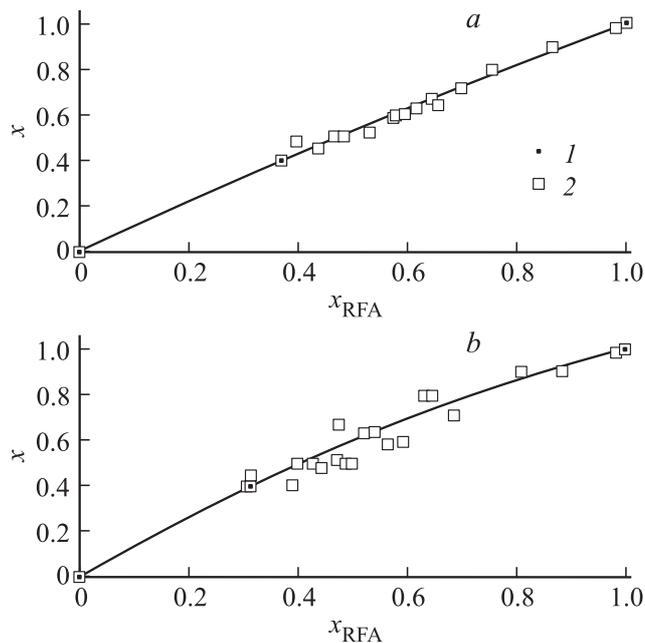
величина может служить верхней оценкой для реальной погрешности в составе при синтезе стекол (существенно большей декларируемой погрешности определения состава шихты  $\pm 0.001$ ).

Учитывая, что германий, мышьяк и селен являются соседними элементами в таблице Д.И. Менделеева, следовало ожидать, что величины, входящие в соотношение (1) и относящиеся к германию, мышьяку и селену, будут близкими между собой и градуировочные графики  $x = f(x_{RFA})$  для систем  $Ge_{1-x}Se_x$  и  $As_{1-x}Se_x$  будут близки к линейным зависимостям. Именно это и наблюдается для системы  $As_{1-x}Se_x$  при использовании как рентгеновского тормозного излучения, так и моноэнергетических электронов (рис. 1, а, б).

Однако для системы  $Ge_{1-x}Se_x$  при использовании тормозного рентгеновского излучения имеет место явное отклонение зависимости  $x = f(x_{RFA})$  от линейной (рис. 2, б). Объясняется это тем, что флуоресцентное излучение более тяжелой компоненты (селен) поглощается более легкой (германий) и вызывает вторичную флуоресценцию последней, что ведет к увеличению относительной интенсивности линии более легкой компоненты, особенно, если  $K$ -край поглощения легкой компоненты совпадает или немного меньше энергии  $K_{\alpha 1,2}$ -излучения тяжелой компоненты (энергия  $K_{\alpha 1,2}$ -излучения Se составляет 11.2 кэВ, а энергия  $K$ -края поглощения германия  $\sim 11.1$  кэВ). Естественно, эффект вторичной флуоресценции может наблюдаться только для физически толстых мишеней (толщиной  $> 0.1$  мм) и, как результат, он реализуется только для случая, когда первичная флуоресценция вызывается тормозным рентгеновским излучением, для которого  $d \geq 0.1$  мм (рис. 2, б). Для физически тонких мишеней (толщиной  $\ll 0.1$  мм) вторичная флуоресценция должна отсутствовать, и это иллюстрируется практически линейной зависимостью  $x = f(x_{RFA})$  для системы  $Ge_{1-x}Se_x$ , когда первичная флуоресценция вызывается электронами (рис. 2, а).

Как и в случае бинарных сплавов, для определения концентраций германия, мышьяка и селена в трехкомпонентных сплавах  $Ge_{1-x-y}As_ySe_x$  мы использовали метод стандарта, для чего строились калибровочные зависимости  $x = f(x_{RFA})$  и  $y = f(y_{RFA})$  с использованием стандартного сплава  $Ge_{0.3333}As_{0.3333}Se_{0.3333}$ . Выбор сплава состава  $Ge_{0.3333}As_{0.3333}Se_{0.3333}$  в качестве стандарта объясняется тем, что он является надежно установленным соединением в системе  $Ge_{1-x-y}As_ySe_x$  и может быть получен в стеклообразном состоянии с высокой точностью определения количественного состава по составу шихты методом сплавления исходных компонент.

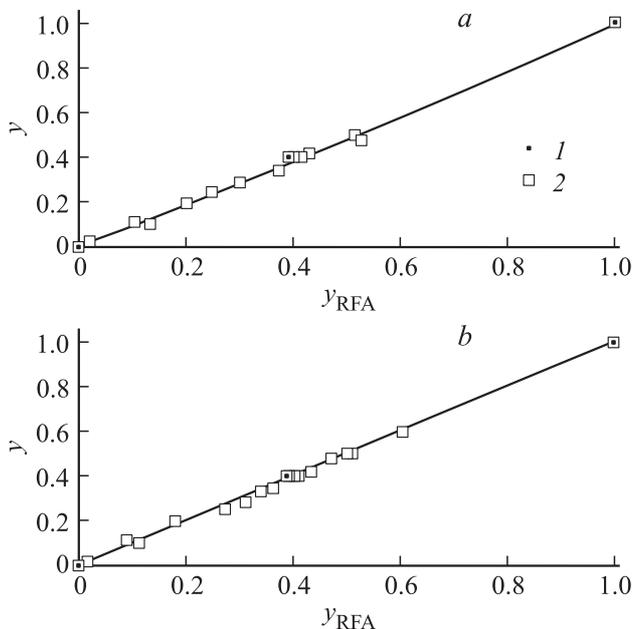
Для случая, когда флуоресценция для сплавов  $Ge_{1-x-y}As_ySe_x$  вызывается электронным пучком, зависимости  $x = f(x_{RFA})$  и  $y = f(y_{RFA})$ , аппроксимированные полиномами второй степени, представлены на рис. 3, а и 4, а. Они могут служить градуировочными соотношениями для определения состава мишеней по полученным из рентгенофлуоресцентных спектров значениям  $x_{RFA}$  и  $y_{RFA}$ .



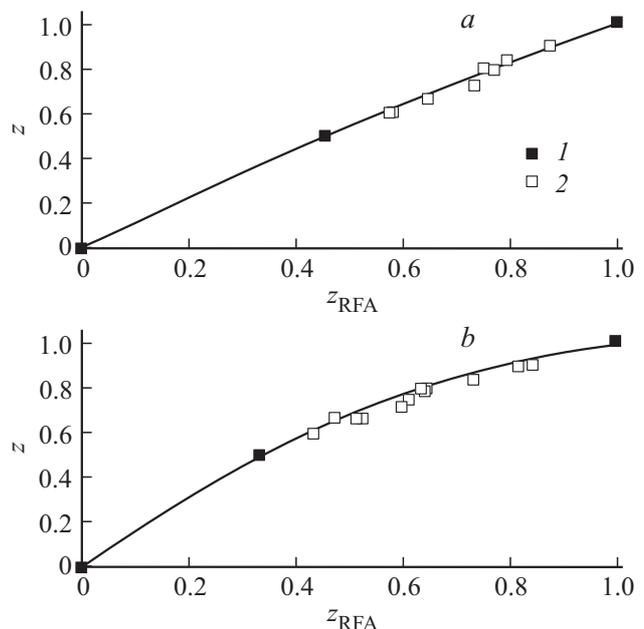
**Рис. 3.** Калибровочные зависимости  $x = f(x_{RFA})$ , полученные при облучении мишеней электронами (а) и тормозным рентгеновским излучением (b) для стекол  $Ge_{1-x-y}As_ySe_x$  (сплошные линии), построенные по трем точкам (1) и аппроксимированные полиномами:  $x = -0.1286x_{RFA}^2 + 1.1286x_{RFA}$  (а),  $x = -0.6035x_{RFA}^2 + 1.6035x_{RFA}$  (b). 2 — значения  $x_{RFA}$  и  $x$  для стекол  $Ge_{1-x}Se_x$ ,  $As_{1-x}Se_x$  и  $Ge_{1-x-y}As_ySe_x$ .

Для демонстрации такой возможности на рис. 3, а и 4, а нанесены экспериментальные значения  $x_{RFA}$ ,  $y_{RFA}$ ,  $x$  и  $y$  как для бинарных, так и для тройных стекол. Видно, что для всех образцов экспериментальные данные хорошо укладываются на градуировочные соотношения между величинами  $x$  и  $x_{RFA}$ ,  $y$  и  $y_{RFA}$ .

Для случая, когда флуоресценция сплавов  $Ge_{1-x-y}As_ySe_x$  вызывается тормозным рентгеновским излучением, зависимости  $x = f(x_{RFA})$  и  $y = f(y_{RFA})$ , аппроксимированные полиномами второй степени, представлены на рис. 3, b и 4, b. На них нанесены экспериментальные значения  $x_{RFA}$ ,  $y_{RFA}$ ,  $x$  и  $y$  как для бинарных, так и тройных стекол и видно, что в случае зависимости  $y = f(y_{RFA})$  для всех образцов экспериментальные данные хорошо укладываются на градуировочные соотношения между величинами  $y$  и  $y_{RFA}$  (рис. 4, b), однако наблюдается значительный разброс экспериментальных точек относительно градуировочной зависимости  $x = f(x_{RFA})$  (рис. 3, b). Это связано с тем, что  $K$ -излучение селена вызывает вторичную флуоресценцию германия, что ведет к росту относительной интенсивности его линии. Замена селена на мышьяк в составе стекла при фиксированном содержании германия ведет к уменьшению вторичной флуоресценции и уменьшению общей интенсивности линии германия. В итоге это приводит к разбросу экспериментальных точек на калибровочных зависимостях  $x = f(x_{RFA})$ .



**Рис. 4.** Калибровочные зависимости  $y = f(y_{RFA})$ , полученные при облучении мишеней электронами (а) и тормозным рентгеновским излучением (b) для стекол  $Ge_{1-x-y}As_ySe_x$  (сплошные линии), построенные по трем точкам (1) и аппроксимированные полиномами:  $y = -0.0236y_{RFA}^2 + 1.0236y_{RFA}$  (а),  $y = -0.0355y_{RFA}^2 + 1.0355y_{RFA}$  (b). 2 — значения  $y_{RFA}$  и  $y$  для стекол  $As_{1-x}Se_x$  и  $Ge_{1-x-y}As_ySe_x$ .



**Рис. 5.** Калибровочные зависимости  $z = f(z_{RFA})$ , полученные при облучении мишеней электронами (а) и тормозным рентгеновским излучением (b) для стекол  $As_y(Ge_{1-z}Se_z)_{1-y}$  (сплошные линии), построенные по трем точкам (1) и аппроксимированные полиномами:  $z = -0.1798z_{RFA}^2 + 1.1798z_{RFA}$  (а),  $z = -0.7295z_{RFA}^2 + 1.7295z_{RFA}$  (b). 2 — значения  $z_{RFA}$  и  $z$  для стекол  $Ge_{1-x}Se_x$  и  $As_y(Ge_{1-z}Se_z)_{1-y}$ .

Однако возможен способ записи состава стекол, при котором описанный выше эффект будет исключен. В частности, состав стекол можно представить в псевдобинарном виде  $As_y(Ge_{1-z}Se_z)_{1-y}$  (т.е. представить в виде двух бинарных систем  $Ge_{1-z}Se_z$  и  $As_yR_{1-y}$ , где  $R = Ge_{1-z}Se_z$ ) с параметрами состава  $y$  и  $z$ , и тогда зависимости относительных площадей спектральных линий германия и мышьяка от параметров  $y$  и  $x$  оказываются однозначными. На рис. 5 представлены калибровочные зависимости  $z_{RFA} = f(z)$  для случаев, когда флуоресценция вызывается электронами (рис. 5, *a*) и тормозным рентгеновским излучением (рис. 5, *b*), которые аппроксимированы полиномами второй степени, и вместе с полиномами на рис. 4 они служат соотношениями для определения состава сплавов по полученным из спектров значениям  $x_{RFA}$ ,  $y_{RFA}$  и  $z_{RFA}$ .

Для демонстрации такой возможности на рис. 5 нанесены экспериментальные значения  $z_{RFA}$  как для бинарных, так и для тройных стекол. Видно, что для всех образцов экспериментальные данные хорошо укладываются на градуировочные соотношения между величинами  $y$  и  $y_{RFA}$ .

#### 4. Заключение

Для определения количественного содержания мышьяка, германия и селена в стеклообразных сплавах  $Ge_{1-x}Se_x$ ,  $As_{1-x}Se_x$  и  $Ge_{1-x-y}As_ySe_x$  методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием возбуждения электронным пучком реализован метод стандарта — строились зависимости  $x = f(x_{RFA})$  и  $y = f(y_{RFA})$ , которые позволяют определить параметры  $x$  и  $y$  с точностью  $\pm 0.0002$  в поверхностном слое глубиной до 0.1 мкм.

Авторы выражают признательность проф. Ф.С. Насредину за полезное обсуждение и доц. В.П. Пронину за помощь при измерении спектров.

#### Список литературы

- [1] Г.А. Бордовский, А.В. Марченко, П.П. Серегин, Н.Н. Смирнова, Е.И. Теруков. Письма ЖТФ, **35**, 15 (2009).
- [2] Г.А. Бордовский, А.В. Марченко, П.П. Серегин, Н.Н. Смирнова, Е.И. Теруков. ФТП, **44**, 26 (2010).
- [3] Г.А. Бордовский, П.В. Гладких, И.В. Еремин, А.В. Марченко, П.П. Серегин, Н.Н. Смирнова, Е.И. Теруков. Письма ЖТФ, **37**, 15 (2011).
- [4] Г.А. Бордовский, А.В. Марченко, А.В. Николаева, П.П. Серегин, Е.И. Теруков. ФТП, **48**, 272 (2014).
- [5] М.А. Блохин, И.Г. Швейцер. Рентгеноспектральный справочник (М., Наука, 1982).
- [6] Л.А. Вайнштейн, И.И. Собельман, Е.А. Юков. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий (М., Наука, 1979).

Редактор Л.В. Шаронова

#### X-ray fluorescence analysis of $Ge_{1-x}Se_x$ , $As_{1-x}S_x$ and $Ge_{1-x-y}As_ySe_z$ glasses at electron excitation

E.I. Terukov<sup>+</sup>, P.P. Seregin\*, A.V. Marchenko\*, D.V. Zhilina<sup>+</sup>, K.U. Bobokhuzhaev<sup>•</sup>

<sup>+</sup> Ioffe Institute,

194021 St. Petersburg, Russia

\* Herzen State Pedagogical University

191186 St. Petersburg, Russia

• National University of Uzbekistan

named after M.Ulugbek,

100174 Tashkent, Uzbekistan